

CindyJSによるコンテンツのWeb上での利用について

東邦大学・薬学部 金子 真隆 (Masataka Kaneko)
Faculty of Pharmaceutical Sciences,
Toho University

合同会社三玄舎 中原 敬広 (Takahiro Nakahara)
Sangensha LLC.

名古屋大学・情報学研究科 中村 泰之 (Yasuyuki Nakamura)
Graduate School of Informatics,
Nagoya University

1 タッチデバイスを用いた数学教育

昨年出版された講究録の中の拙稿 [1] において, CindyJS (<https://cindyjs.org/>) により生成されるタンジブルなコンテンツを用いた数学教育の可能性について論じた. CindyJS は, 動的幾何ソフトウェア Cinderella を起点とし, その動的コンテンツを html 形式に自動的に変換することにより, iPad やスマートフォンなどのタッチデバイス上で, コンテンツのブラウザベースでの操作を可能とするシステムである [2][3][4]. これを用いると, アプリのインストールや操作方法への習熟などの負担を求めることなく, 学習者に幾何的図形や関数のグラフを含む数理的モデルを, インタラクティブに操作させることが可能である.

数理的なモデルを自らの手で操作すること (action) の重要性については, Piaget [5] などの数多くの指摘があり, 最近でもタッチ操作などの体性感覚を伴う操作の思考プロセス形成への関与を示唆する研究 [6] などが行われているが, それらが対象とするのはもっぱら初等教育段階の学習についてであり, とりわけ高等教育段階に関するものはこれまで非常に少なかったと考えられる. その背景には, 高等教育段階で扱われる抽象的な内容を操作可能なモデルとして具現化することが必ずしも容易でないことに加え, そもそもタッチデバイスを利用することならではの教育効果とはどのようなものか, 教育者自身が明確なイメージを持ちづらいという事情があると考えられる. しかしその一方で, 数学高等教育を学んで行く前提として当然身につけていなくてはならない関数のグラフの描画などについて, 十分に習熟したとは言い難い状態で大学に入学してくる学生が増えてきているのも事実であり, 実はこのような部分こそ, 体性感覚を伴った学習が効果を発揮することを期待しうる部分でもある. そこで筆者 (金子) はここ 1 年ほどの間, 特に習熟度が問題となりやすい「三角関数のグラフの描画」をテーマとして, リメディアルコースの学生を対象に関連した CindyJS のタンジブルな教材を iPad 上で学生に操作させ, 描画プロセスにどのような影響が及ぼされるか追跡する試みを続けてきている. 詳細は該当の研究報告に譲るが [7][8], 単に自分のペースで描画メカニズムを確認できるということにとどまらず, 円周上を回転する指に加わるリズムカルな触覚刺激が描画

されるグラフの周期的で滑らかな形状に関する意識を喚起しうる教育的効果が示唆されている。

このように、授業の中でタンジブルな教材を使う効果がそれなりに期待されるわけであるが、iPadを学生に購入させるか貸与するかしらない限り、該当の教材を授業後に使わせることは事実上難しく、せっかく得られた教育的効果が一過性のものになってしまう危険性は避けようがない。この問題を解決するには、何らかのウェブサイト上に動的なコンテンツを実装し、そこにPCやスマートフォンなどを用いてアクセスして操作させることしか現状では方法がないであろう。そこで筆者(中原)は、学習管理システムとして利用が広がりつつあるMoodleにCindyJS専用のプラグインを構築し、授業中にiPadで操作させたタンジブルな教材を置いて、学生に授業後も自由に操作させられる環境を用意した。本稿では、大学1年生の微分積分の授業で実際にこのシステムを活用してみた際の状況について報告する。

2 CindyJSによるコンテンツのMoodle上での利用

図1は、該当のクラスのために用意されたwebページの画像である。



図1 web ページの様子

該当のクラスは35名程度の学生から構成されるが、高等学校段階で数学IIまでは履修したことになっているものの、その習得状況にも不安がある学生が少なくなく、ましてや数学IIIについてはほとんどの学生が履修しておらず、高校数学の学習内容に関するリメディアルに相当時間を割かなくてはならない状況であった。このため該当のページには、通常は高等学校で扱われるような項目も並んでいる。掲載されているCindyJSによるコンテンツはいずれも、専用ページ(<https://cindyjs.org/dist/v0.8.5/>)からダウンロードしたCindyJSの「ライブラリ」とともにiPad内の同一のファイルシステムに入れることにより、授業中にオフラインの状況で学生たちに操作させたものばかりである。htmlファイルの中に上記のライブラリのpathを指定し、オンラインのPCやスマートフォンに取り込んでおけば、ライブラリをインターネット経由で自動的に読み込んで操作することができるが、本稿で提示するMoodle上の利用のケースでは、プラグインの中にライブラリを組み込む形をとっている。

この中で、たとえば一番下の「置換積分に関する動かす教材」というタグをクリックすると、図2のようにCindyJSで生成された動的なコンテンツを含むページが開き、スマートフォンなどで実際に操作することが出来る。



図2 実装されたCindyJSによるコンテンツの様子

見ての通り、動的コンテンツ単体としてでなく、数式表現を含む言葉での説明の部分とともに提示できるのがこの方法の利点の1つである。

CindyJSによるコンテンツをいったん生成してしまえば、これを該当のwebサイトに実装する手続きは以下の通り非常に簡単である。まず、図3に示すように、実装したい「トピック」で「活動またはリソースを追加する」というタグをクリックする。



図3 コンテンツ実装のプロセス(1)

すると、図4に示すように、追加するリソースの種別を指定するポップアップウィンドウが開くので、CindyJSの項目を選択する。

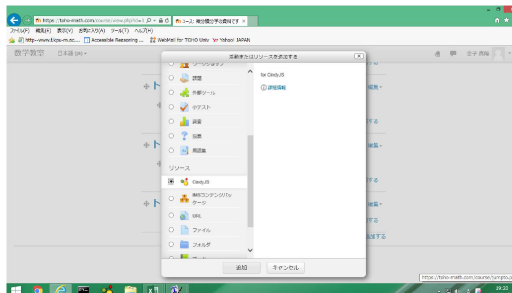


図4 コンテンツ実装のプロセス(2)

後は図5に示す通り、コンテンツのhtmlファイルを該当のページにドラッグ・ドロップするだけである。

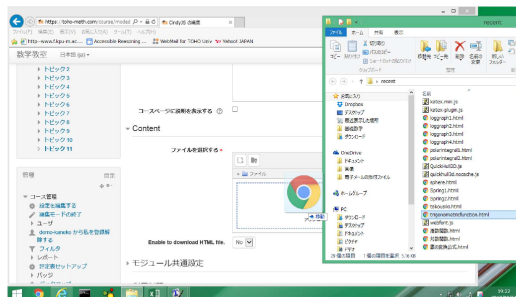


図5 コンテンツ実装のプロセス(3)

全体として使用したコンテンツのテーマは多岐にわたるが、その中で利用状況の調査に用いたのは、前節にふれた「関数のグラフ描画」に関わる部分である。これは、該当の内容が、単発的なコンテンツの操作によって習熟を期待しづらく、授業後に繰り返し操作してみることを期待しうるテーマだからである。たとえば図6は、「三角関数のグラフ描画」の復習の際に用いられたコンテンツである。

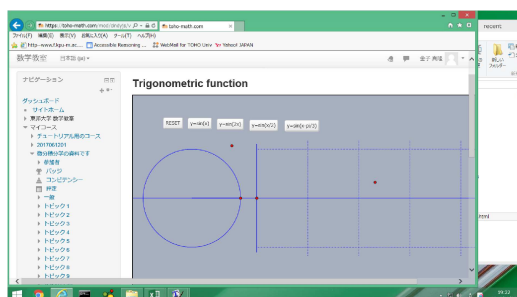


図6 三角関数のグラフ描画に関するコンテンツ

3 利用状況調査のフローと結果

上述のように、関数のグラフ描画を含む CindyJS によるコンテンツを授業中に iPad で操作させた上で、授業後に web サイトにアクセスして自由に利用できるようにしたわけだが、学生個々にアカウントを発行してアクセス履歴をとることまでは行っていなかった上に、アクセスは学生の自由意思に任せて強制はしなかったこともあり、利用状況の調査は専らアンケート形式で行わざるを得ない状況であった。また、グラフ描画というテーマの性格上、学生の定着度を確認するには実際にグラフを描かせてみるしか方法がなかった。このため、定期試験の際に授業中に扱った4種類の関数のグラフを描かせてみると同時に、web サイトにアクセスしてコンテンツを操作した状況についてアンケート形式で尋ねることにした。図7は、試験の際に描画させた関数と解答用紙の様子である。

1. 次の関数のグラフをかけ。

(1) $y = \frac{-x+4}{x-2}$

(2) $y = \sin\left(\frac{1}{2}x + \frac{1}{6}\pi\right)$

(3) $y = -\sqrt{-x-2}$

(4) $y = 3x^4 - 8x^3 - 6x^2 + 24x + 2$

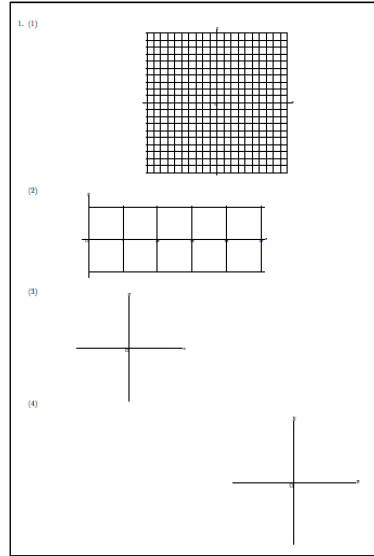


図7 確認用の問題と解答用紙

また、定期試験の際に実施したアンケートの質問項目は以下の通りである。

1. 春学期中に、webに掲載してある動かす教材を閲覧したことはありますか。
2. (1.でYesの場合)
 - (a) 閲覧したのはどの教材ですか。
 - (b) どのようなポイントを復習するために、その教材を閲覧しましたか。
 - (c) iPadで操作したときと比較して、操作性はどうでしたか。
3. (1.でNoの場合) 閲覧しなかった理由は次のうちのどれですか。
 - (a) プリント等で理解できてしまうので、動かす教材に必要を感じなかった。
 - (b) iPadで操作してすべて理解でき、webを見る必要を感じなかった。
 - (c) 見ようとしたが、スマートフォンの画面が小さすぎる。
 - (d) 見ようとしたが、操作の仕方がわからなかった。
 - (e) iPadを操作してわからなかったので、webでもわからないと思った。

採点は、いずれの課題についてもいくつかの具体的な評価項目を設けた上で、各課題とも10点満点の設定で比較的厳密に行った。表1は、採点結果とアンケートへの回答状況とを対照する形で集計したものである。各行が得点、各列がアンケートへの回答を表しており、質問3で複数の項目に重複して回答した事例はなかった。基本的に一つの○が該当の得点および回答の学生1名を表しており、試験の受験者が32名であったことになる。列の並び順としては、質問1にNoと回答したものを質問3に(a)と回答したものから(e)と回答したものまで左から順番に並べ、その右に質問1にYesと回答したものを並べた。後者の回答に対し、さらにその右に質問2への回答を略記して並べてある。学習者が操作した時点から試験実施までかなり時間が経過していたこともあって、

(a)(b) に対する回答が明確でないものもあったが、記述からわかる範囲の内容を表中の「目的」の欄に書き込んである。一番右の列の「その他」は、質問1に No と回答したもので、特に記載があったものである。

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	Yes	目的	比較	その他	
40	○	○	○	○		○	グラフを描くため	使い方が難しかった		
39										
38										
37	○	○				○	逆三角関数の値の動きを見るため	画面が小さいためか、arccosの値を数かせなかった		
36										
35							○	三角関数のグラフの描き方を復習するため	画面が小さくやりやすかった	
34		○								
33	○		○							
32	○	○	○			○	グラフの動きの確認のため	変わらない		
31		○	○							
30				○		○	グラフが表示範囲を確認するため	とてもいい		
29										
28										
27						○	授業内容を思い出すため	iPadの方が画面が大きく操作しやすかった		
26										
25										
24				○						
23										
22			○							
21										
20										
19										
18					○				iPadは思った以上にわかりにくい	
17										
16		○								
15										
14						○				
13						○				
12				○	○					
11										
10										
9										
8										
7										
6										
5						○			iPadより先生が直接黒板に描いた方がいい	
4										
3										
2										
1						○			iPadは使いにくかった	

表1 採点結果とアンケート回答の集計

質問3に (d) と回答したものについて、さらに詳しい状況を事後にヒアリングしたところ、結果は以下の通りとなった。

1. webサイトにアクセスするためのQRコードの使い方がわからなかった。
2. ログインページまでは行くことができたが、ログインできなかった(2名)。
3. ログインはできたが、コンテンツをうまく動かすことができなかった。

回答2については、ゲストアカウントでログイン出来ることを授業中に伝えていたものの、これが十分に浸透しておらず、その後教員に問い合わせるまでには至らなかった、という状況のようである。また、回答3については、アンケート (b) と同様、スマートフォンの画面の小ささに起因するもののように、デバイスをPCに切り替えて操作してみるという段階までにはやはり至らなかった、という状況のようである。

本調査の場合、まずは授業の中でiPadに入れたコンテンツを操作させることを前提としたが、利用可能なiPadが最大でも25台に限られたため、調査対象とできる学生の数も35名程度にとどまらざるを得なかった。また、対象となった学生は生物・環境系の学科に所属し、その後に専門科目を学習する上で数学の履修が必須とは言えない上、アンケートで高校時代に数学の学習が「嫌いだった」と回答する者の比率が低くないなど、数学の学習へのモチベーションの維持にも若干苦勞するところがあった。こうした点で、以上の調査結果を解釈する上で難しい点は若干あるが、それでも以下のような諸点を指摘することはできるであろう。

1. 実際にweb上でCindyJSのコンテンツを操作するに至った学生は、回答総数32の中の6名ということで、一見少ないようにも見える。しかし、質問項目3で(c)や(d)と回答した学生については、最終的に操作するまでに至らなかったものの、なんらかの形で利用を検討していたことは明らかであり、ここまで含めると全体の

約半数の15名になることを考えると、動的なコンテンツのweb上での利用に対する潜在的なニーズは決して小さくないものと判断される。

2. 加えて、質問項目3で(b)と回答した学生も加えると、全体の3分の2に相当する21名に達し、動的コンテンツの利用に対するニーズも少なからず存在することが示唆される。
3. 質問項目3で(e)と回答した5名の学生のうち得点が下から3名までは授業の欠席が多く、授業の中で十分にコンテンツの操作を体験できていない面があった。また、得点が18の学生については、三角関数のグラフを扱う場合の弧度法の知識のように、前提となる高校数学の基礎的知識の定着度に少なからず不安があり、本質的な問題はこのあたりにあったように見受けられる。
4. (e)と回答した残り1名の学生についてはやや問題が大きい。個人のプライバシーにも関わりかねないので必要以上の詳細はここで述べられないが、該当の学生は授業中、他の学生のように数人のグループで着席することがなく、つねに一人で授業を受けている状態で、他の出席者との対話もまったくない。当然、コンテンツの操作も単独で行おうとするが、要領がつかめないまま途方にくれている状況がしばしば見られ、そうした場合にこちらからかなり働きかけないと質問行動などのアクションがなかなか起こってこなかった。このようなタイプの学生はどこにも存在する可能性があり、タンジブルなコンテンツを操作させる場合に考慮しておかなくてはならないファクターであろう。

以上のような前提で表1の集計結果を見たときにどうしても目に入るのは、回答(a)から(d)にかけて、対角線近辺の部分に分布が集中しているという点である。この結果を裏返して見れば、学習者が必要なときに必要なだけ滑らかに接続できるインターネット環境や、コンテンツによって随時PCを利用できる環境など、web上でコンテンツを操作させる上でのインフラストラクチャーがより十分に整備され、なおかつコンテンツを利用することに対するインセンティブがより適切に与えられていれば、対象者のパフォーマンスが大きく変わっていた可能性を示唆していると考えられる。

4 今後の課題

本稿で紹介したCindyJSによる動的コンテンツのweb上での利用については、その後1年間を通して継続してはいるものの、試行段階にとどまっている面も強く、今後の課題は多い。特に、学習管理システムとして多彩な機能を有するMoodleと連携できるメリットを十分に生かしているかという点がその中心である。本節では少し紙幅を割いてそうした課題のいくつかに言及したい。

まず第1の課題は、Moodleに装備されている多様なコンテンツ提供機能との連携についてである。動的コンテンツを操作して理解できた内容をwebサイト上で報告させるなどといったことは当然考えられるところであるが、最近ではSTACKを用いて数式入力が簡単に行えるようになってきているので、できることの幅は急速に広がっている。実際、筆者(中村)は微分方程式の解曲線をインタラクティブに操作させるためのCindyJSのコンテンツを実装した上で、関連する課題に対する解答をweb上で入力させる事例を

作っている [9]。ここまで出来ているのであれば、これをさらに一歩進めて、web サイトに入力した数値情報を CindyJS のシステムに取り込み、インタラクティブな操作に即時に反映させるというフローの実現が期待される。残念ながら現状では、CindyJS のシステム自体がこのようなフローに対応できていないため実現が難しいが、こうした連携が可能になればより使いやすい教材を提供できるようになるはずである。

第2の課題は、Moodleを通じて集積される学習者の学習過程に関する情報の活用についてである。もとより、CindyJS を含む動的コンテンツを学習者自らに操作させることについては、紙媒体上で課題を解決させたりするのは異なる種類の教育効果の存在が想定される。動的コンテンツの操作特有の教育効果の実態を解明するため、筆者(金子)は関数の多項式近似に関するシミュレーションを行えるタンジブルな教材を CindyJS により作成し、学習者が操作した際の画面録画をもとに操作経過を時系列的に視覚化して、対象者の思考過程がどのように変容していったか追跡することを試みている。詳細な分析は該当の研究報告に譲るが [10][11]、数式表現のみによってでは実質的な理解に達しづらい「高次の無限小」の概念について、学習者が試行錯誤を繰り返しながら体験的に学べている可能性が強く示唆されている。この例が示すように、動的なコンテンツを学習者が操作した経過には、学習者が数学的な概念を理解していく思考過程について、関連タスクに取り組んだ際の筆記の記録などとは異なる種類の情報を含んでいる可能性が高い。したがって、web 上で学習者が動的コンテンツを操作した経過に関する情報を取得できれば、より多くのデータを用いて思考過程の解析を行える可能性が生じ、タンジブルな教材を利用することの教育的意義自体についてもより客観的な知見を得ることができると期待される。動的なコンテンツについて web 上で操作経過に関する情報の取得を目指した場合、やりとりされるデータのサイズが大きくなりかねず、技術的にクリアしなくてはならないハードルは低くないが、コンテンツの利用目的に応じて取得する情報を適切に選別するなどの工夫により、実現は不可能ではないと考えている。

第3の課題は、アクティブラーニングとの関連で最近利用が広がっているクリッカーと類似の機能を Moodle に担わせた上で、CindyJS のコンテンツの操作との連携を図れないかという点である。クリッカーの最大の利点の一つは、学習者の理解や作業の進捗状況を即座に集積し、授業の展開に素早くフィードバックをかけられる点である。CindyJS による動的コンテンツを操作させる場合、学習者によって操作の進捗に差が広がる可能性が高く、一般的な机間巡視のみでペースの調整を図ることは難しい。Moodle に装備されている「小テスト」などの機能を活用すれば、予め設定されたポイントについて個々の学習者がクリアできているか否かという情報を、ボタン押下程度の簡単な作業で即時に集積することが可能であり、CindyJS によるコンテンツを操作させる場合のペースの調整などに大きな助けとなることが期待される。以上のような連携は、学習者に自らのスマートフォンを使わせる場合を想定すれば、現段階でも実現可能であるが、本稿のアンケート結果に見られる通り、CindyJS のコンテンツを操作させる上でスマートフォンの画面が小さすぎるという問題があり、可能な限りスマートフォンを iPad などに置き換えて実施することが望ましいと考えられる。当然、前節の最後に触れたようなインフラストラクチャーの問題は出てくるが、学習者2人から3人に1台の iPad を配布して、100人規模のクラスでも常時ネット接続している iPad が40台弱程度に抑えられるよう

にすれば、一般的な教育機関のネットワーク環境でなんとか使っていくことができるのではないだろうか。

いずれにしても、動的なコンテンツを学習者個々に操作させるという試み自体が新しいものであり、その実現には少なからぬ初期投資が求められることもあるので、利用者を増やすことを急ぐ前に、学習者自身によるインタラクティブな操作が持つ教育的意義について確認する経験を、まずは少人数の学習者を対象としながら、ひとつひとつ積み重ねていくことが先決だと考えられる。

謝辞

本研究は、京都大学数理解析研究所共同事業「数学ソフトウェアとその効果的教育利用に関する研究」による成果である。本研究は JSPS 科研費 15K01037 の助成を受けている。また、本研究で用いた iPad の購入にあたっては、平成 28 年度東邦大学教育改革推進 GP による全面的な支援を受けた。この場を借りて厚く御礼申し上げる。

参考文献

- [1] 金子真隆: CindyJS によるアクティブラーニングの可能性, 京都大学数理解析研究所講究録 2022, pp.48–58, 2017
- [2] M. von Gagern, U. Kortenkamp, J. Richter-Gebert, M. Strobel: CindyJS – mathematical visualization on modern devices, *Lecture Notes in Computer Science* 9725, pp.319–326, 2016
- [3] M. von Gagern, J. Richter-Gebert: CindyJS plugins – extending the mathematical visualization framework, *Lecture Notes in Computer Science* 9725, pp.327–334, 2016
- [4] A. Montag, J. Richter-Gebert: CindyGL – authoring GPU-based interactive mathematical content, *Lecture Notes in Computer Science* 9725, pp.359–366, 2016
- [5] Jean Piaget, *The Role of Action in the Development of Thinking*, In: Overton W.F., Gallagher J.M. (eds), *Knowledge and Development*, pp.17–43, 1977
- [6] P. Ginns, F. T. Hu, E. Byrne, J. Bobis: Learning by tracing worked examples, *Applied Cognitive Psychology* 30, pp.160–169, 2016
- [7] M. Kaneko: Interactive manipulation of math models via touch devices affecting reasoning processes, *Proceedings of MathUI 2017*, 掲載準備中, 2017
- [8] 金子真隆: CindyJS によるタンジブルな教材の利用による数学学習者のグラフ描画への影響の分析, 日本科学教育学会第 41 回年会講演論文集, pp.23–24, 2017
- [9] Y. Nakamura, T. Nakahara, M. Kaneko, S. Takato: Authoring Quizzes with Interactive Content on the Mathematics e-Learning System STACK, *Lecture Notes in Computer Science* 10407, pp.273–284, 2017

- [10] M. Kaneko: Using tangible contents generated by CindyJS and its influence on mathematical cognition, Lecture Notes in Computer Science 10407, pp.199–215, 2017
- [11] 金子真隆: CindyJS によるタンジブルなコンテンツの操作履歴に基づく数学学習者の思考過程の追跡, 日本教育工学会第 33 回全国大会講演論文集, pp.517–518, 2017